UDC 582.28:639.311 **DOI: 10.58407/bht.1.26.4**

Copyright (c) 2026 Lidiia Polotnianko, Dmytrii Filonenko
Ця робота ліцензується відповідно до Creative Commons Attribution 4.0 International License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Лідія Полотнянко, Дмитрій Філоненко

БІОХІМІЧНІ МАРКЕРИ ТОКСИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА АДАПТАЦІЙНИХ РЕАКЦІЙ СТАВКОВИХ РИБ ЗА ДІЇ МІКОТОКСИНІВ

Lidiia Polotnianko, Dmytrii Filonenko

BIOCHEMICAL MARKERS OF TOXIC LOAD AND ADAPTATIVE REACTIONS OF POND FISH TO MYCOTOXINS

АНОТАЦІЯ

Мікотоксини, як вторинні метаболіти мікроміцетів, є одними з найнебезпечніших біологічних контамінантів кормової сировини та комбікормів для риб. У системі ставкової аквакультури їх дія супроводжується порушенням метаболічного гомеостазу гідробіонтів, зниженням продуктивності та формуванням ризиків біобезпеки. Особливу небезпеку для риб становлять афлатоксин В1 і Т-2 токсин, які характеризуються вираженою гепатотоксичною, генотоксичною та прооксидантною дією. У зв’язку з цим актуальним є пошук інформативних біохімічних маркерів, що дозволяють оцінити рівень токсичного навантаження та адаптаційні реакції організму риб за умов мікотоксикозів.

Мета роботи. визначити інформативні біохімічні маркери токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів, зокрема афлатоксину В1 та Т-2 токсину, шляхом аналізу змін показників енергетичного обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних процесів у тканинах риб різного виду та віку.

Методологія ґрунтувалася на експериментальному моделюванні мікотоксичного навантаження у коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) та карася звичайного (*Carassius carassius* Linnaeus, 1758) різного віку. Дію афлатоксину В1 і Т-2 токсину вивчали в концентрації 2 гранично допустимих рівнів. Стан енергетичного обміну оцінювали за вмістом аденілових нуклеотидів (АТФ, АДФ, АМФ), аденілатного енергетичного заряду та показників аденілаткіназної реакції. Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів визначали за вмістом тіобарбітуровокислотно-активних продуктів. Метаболічні процеси аналізували за показниками фосфатного та енергетичного обміну в тканинах риб.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до оцінки біохімічних маркерів мікотоксичного навантаження з урахуванням виду та віку ставкових риб. Уперше показано взаємозв’язок між порушенням нуклеїнового обміну, активацією перекисного окиснення ліпідів та адаптаційною перебудовою енергетичного метаболізму в організмі коропових риб за дії афлатоксину В1 і Т-2 токсину. Встановлено міжвидові та вікові відмінності чутливості риб до мікотоксичного впливу.

Висновки. Установлено, що дія афлатоксину В1 та Т-2 токсину призводить до зниження вмісту АТФ, зростання концентрацій АДФ і АМФ, зменшення аденілатного енергетичного заряду та активації перекисного окиснення ліпідів у тканинах риб. Виявлені зміни мають як деструктивний, так і адаптаційний характер і відображають напруження метаболічних процесів за умов токсичного стресу. Показано, що карась звичайний і цьоголітки є більш чутливими до дії мікотоксинів порівняно з коропом лускатим і старшими віковими групами. Отримані результати підтверджують доцільність використання показників нуклеїнового обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних зрушень як інформативних біохімічних маркерів токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб у системі аквакультури.

Ключові слова: мікотоксини, афлатоксин В1, Т-2 токсин, ставкові риби, енергетичний обмін, нуклеїновий обмін, перекисне окиснення ліпідів, адаптаційні реакції, біохімічні маркери

ABSTRACT

Mycotoxins, as secondary metabolites of micromycetes, are among the most dangerous biological contaminants of feed raw materials and compound feeds for fish. In pond aquaculture systems, their impact is associated with disturbances of metabolic homeostasis in hydrobionts, reduced productivity, and the formation of biosafety risks. Aflatoxin B1 and T-2 toxin are considered particularly hazardous for fish due to their pronounced hepatotoxic, genotoxic, and pro-oxidant effects. In this context, the identification of informative biochemical markers that allow assessment of toxic load and adaptive responses in fish organisms under mycotoxicosis conditions is of significant relevance.

Purpose of the work. The aim of the study was to identify informative biochemical markers of toxic load and adaptive responses in pond fish exposed to mycotoxins, specifically aflatoxin B1 and T-2 toxin, through the analysis of changes in energy metabolism indicators, lipid peroxidation intensity, and metabolic processes in tissues of fish of different species and ages.

Methodology. The study was based on experimental modeling of mycotoxic exposure in scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) and crucian carp (*Carassius carassius* Linnaeus, 1758) of different age groups. The effects of aflatoxin B1 and T-2 toxin were investigated at concentrations corresponding to two maximum permissible levels. The state of energy metabolism was assessed by determining the content of adenylate nucleotides (ATP, ADP, AMP), adenylate energy charge, and indicators of the adenylate kinase reaction. The intensity of lipid peroxidation was evaluated by measuring thiobarbituric acid-reactive substances. Metabolic processes were analyzed using indicators of phosphate and energy metabolism in fish tissues.

Scientific novelty. The scientific novelty of this study lies in a comprehensive approach to evaluating biochemical markers of mycotoxic load with consideration of fish species and age. For the first time, the relationship between disturbances in nucleic acid metabolism, activation of lipid peroxidation, and adaptive restructuring of energy metabolism in cyprinid fish under the action of aflatoxin B1 and T-2 toxin has been demonstrated. Interspecific and age-related differences in fish sensitivity to mycotoxic exposure were established.

Conclusions. It was found that exposure to aflatoxin B1 and T-2 toxin leads to a decrease in ATP content, an increase in ADP and AMP concentrations, a reduction in adenylate energy charge, and activation of lipid peroxidation in fish tissues. The detected changes exhibit both destructive and adaptive characteristics and reflect metabolic stress under toxic conditions. Crucian carp and young-of-the-year fish were shown to be more sensitive to mycotoxin exposure compared to scaly carp and older age groups. The obtained results confirm the feasibility of using indicators of nucleic acid metabolism, lipid peroxidation intensity, and metabolic shifts as informative biochemical markers of toxic load and adaptive responses in pond fish within aquaculture systems.

Key words: mycotoxins, aflatoxin B1, T-2 toxin, pond fish, energy metabolism, nucleic acid metabolism, lipid peroxidation, adaptive responses, biochemical markers

Вступ

Мікотоксини є однією з найбільш поширених і біологічно небезпечних груп вторинних метаболітів мікроміцетів, що контамінують кормову сировину та готові корми для гідробіонтів. Поширеність афлатоксинів підтверджується численними дослідженнями харчових продуктів різного походження, зокрема консервованої та переробленої продукції, що свідчить про стійкість цих токсинів до технологічної обробки та їх здатність зберігатися в харчових ланцюгах (Mushtaq et al., 2012; Hassan, 2018). У системі сучасного ставкового рибництва проблема мікотоксикозів набуває особливої актуальності у зв'язку з інтенсифікацією виробництва, використанням концентрованих комбікормів і глобальними кліматичними змінами, які сприяють росту токсинопродукуючих грибів (Koletsi et al., 2021; Gruber-Dorninger et al., 2025). Серед найбільш небезпечних для риб мікотоксинів виділяють афлатоксин B1 та T-2 токсин, що характеризуються вираженою гепатотоксичною, генотоксичною та прооксидантною дією (Pickova et al., 2021; Liu et al., 2023).

Надходження мікотоксинів в організм риб супроводжується порушенням ключових метаболічних процесів, насамперед білкового, ліпідного та нуклеїнового обміну, а також активацією вільнорадикальних реакцій і розвитком оксидативного стресу (Simonova & Mekhed, 2025a; Filonenko & Mekhed, 2025). Показники перекисного окиснення ліпідів, стан антиоксидантної системи, вміст нуклеїнових кислот і зміни біохімічного складу тканин розглядаються як інформативні біохімічні маркери токсичного навантаження, що відображають як ступінь ушкодження клітинних структур, так і адаптаційні можливості організму (Nikolaenko et al., 2023; Polotnianko & Mekhed, 2023).

Численні експериментальні дослідження свідчать, що вплив афлатоксину B1 і T-2 токсину на риб супроводжується зниженням темпів росту, морфофункціональними змі-

нами печінки, дестабілізацією мембран і накопиченням токсинів у тканинах, що має як екологічні, так і біобезпекові наслідки (Fornari et al., 2023; Polotnianko & Mekhed, 2024). Водночас біохімічні реакції організму риб на дію мікотоксинів мають адаптаційний характер і залежать від виду, віку, тривалості та інтенсивності токсичного впливу, що зумовлює необхідність комплексної оцінки метаболічних змін (Mekhed, 2024; Shkurko et al., 2024).

У цьому контексті актуальним є визначення комплексу біохімічних маркерів, які дозволяють об'єктивно оцінити рівень токсичного навантаження та адаптаційні реакції ставкових риб за дії мікотоксинів. Такий підхід має важливе значення для поглиблення уявлень про механізми мікотоксичної дії, прогнозування стійкості гідробіонтів до контамінованих кормів і розробки біологічно обґрунтованих заходів зниження ризиків у системі аквакультури (Vanhoutte et al., 2016; Gruber-Dorninger et al., 2025).

Мета роботи – визначення інформативних біохімічних маркерів токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів, шляхом аналізу змін показників метаболічних процесів у тканинах риб різного виду та віку. Досягнення поставленої мети спрямоване на поглиблення уявлень про механізми мікотоксичної дії, оцінку стійкості організму риб до токсичного впливу та наукове обґрунтування підходів до біобезпеки в умовах ставкової аквакультури.

Мікотоксини є широко поширеними контамінантами кормової сировини та комбікормів для риб, що зумовлює їх постійне надходження до організму гідробіонтів у процесі вирощування (Koletsi et al., 2021; Gruber-Dorninger et al., 2025). Дослідження останніх років свідчать про багатокомпонентний характер контамінації кормів, коли одночасно виявляють кілька регульованих, маскованих і «нових» мікотоксинів, що потенційно підсилює токсичний ефект і ускладнює оцінку ризиків для аквакультури (Kovalsky et al., 2016; Gruber-Dorninger et al., 2025).

Афлатоксин В1 вважається одним із найбільш небезпечних мікотоксинів завдяки вираженій гепатотоксичній, канцерогенній та генотоксичній дії. Його негативний вплив детально описано для різних груп тварин і людини, зокрема у випадках гострих та хронічних афлатоксикозів (Lye et al., 1995; Strosnider et al., 2006). Для риб встановлено, що афлатоксин В1 порушує ріст, обмін білків і ліпідів, спричиняє структурні та функціональні ушкодження печінки й інших органів (Liu et al., 2023; Fornari et al., 2023). Аналогічно Т-2 токсин характеризується цитотоксичною та прооксидантною дією, що призводить до глибоких метаболічних порушень у гідробіонтів (Mekhed, 2024).

Одним із ключових механізмів мікотоксичної дії є індукція оксидативного стресу, що проявляється активацією перекисного окиснення ліпідів та дестабілізацією клітинних мембран. Показано, що інтенсивність ПОЛ у тканинах риб зростає під впливом токсикантів різної хімічної природи, включно з мікотоксинами, і може розглядатися як чутливий біохімічний маркер токсичного навантаження (Simonova & Mekhed, 2025b). Зміни рівня продуктів ПОЛ корелюють із функціональним станом печінки та антиоксидантної системи, що дозволяє оцінювати ступінь ушкодження і адаптаційні резерви організму.

Важливе місце серед біохімічних маркерів мікотоксикозів займають показники нуклеїнового обміну. Порушення синтезу та вмісту нуклеїнових кислот у тканинах риб свідчать про генотоксичний ефект афлатоксину В1 та пригнічення проліферативних процесів (Filonenko & Mekhed, 2025). Такі зміни розглядаються не лише як прояв токсичного ураження, а й як показник глибини метаболічної перебудови клітин у відповідь на дію ксенобіотиків.

Дослідження, проведені на коропових рибах, демонструють, що біохімічні та гематологічні показники можуть зазнавати адаптивних змін у відповідь на хронічне токсичне навантаження, відображаючи спробу організму зберегти гомеостаз (Nikolaenko et al., 2023; Shkurko et al., 2024). Водночас накопичення мікотоксинів у тканинах, зокрема у м'язах і печінці, створює ризики як для здоров'я риб, так і для безпеки продукції аквакультури (Polotnianko & Mekhed, 2023).

Дослідження, проведені в різних регіонах світу, свідчать про систематичне виявлення мікроскопічних грибів і мікотоксинів у продуктах тваринного походження, включно з ферментованими м'ясними виробами, що підкреслює універсальний характер

проблеми мікотоксикозів у агропродовольчих системах (Pleadin et al., 2017). Забезпечення якості та безпеки продукції тваринного походження безпосередньо пов'язане з контролем контамінації кормів токсичними сполуками, зокрема мікотоксинами, що розглядається як один із ключових напрямів сучасних стратегій харчової безпеки (Sevi et al., 2016). З огляду на доведену здатність мікотоксинів зберігатися у харчових продуктах та акумулюватися в трофічних ланцюгах, актуальним є дослідження механізмів їх дії на гідробіонтів і пошук біохімічних маркерів токсичного навантаження в умовах аквакультури (Mushtaq et al., 2012; Pleadin et al., 2017; Hassan, 2018).

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що комплексна оцінка біохімічних показників – інтенсивності перекисного окиснення ліпідів, стану нуклеїнового обміну та загальних метаболічних зрушень – є перспективним підходом для виявлення маркерів токсичного навантаження і адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів. Однак питання інтегрованої інтерпретації цих маркерів з урахуванням виду риб і характеру токсичного впливу потребує подальших досліджень, що й зумовлює актуальність даної роботи.

Матеріали та методи дослідження

Експериментальні дослідження проводилися упродовж 2023–2025 років на базі проблемної науково-дослідної лабораторії екологічної біохімії, іхтіології та біокорозії природничо-математичного факультету Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка. Роботи зі стандартними зразками мікотоксинів виконувалися на базі акредитованої лабораторії Держпродспоживслужби України.

Об'єктом дослідження були ставкові риби родини Cyprinidae, зокрема короп лускатий (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) різного віку та карась звичайний (*Carassius carassius* Linnaeus, 1758). Риб утримували в експериментальних умовах у 200-літрових акваріумах з відстояною водопровідною водою за щільності посадки 1 екземпляр на 40 $дм^3$ води. Упродовж досліду контролювали та підтримували стабільні гідрохімічні показники води (температура, вміст розчиненого кисню, pH).

Мікотоксичне навантаження моделювали шляхом внесення у воду або корм розрахункових кількостей афлатоксину В1 або Т-2 токсину в концентрації, що відповідала 2 гранично допустимим концентраціям (2 ГДК). Контрольна група риб утримувалася в аналогічних умовах без додавання мікотоксинів. Тривалість експозиції визначалася схемою експерименту та становила від кількох діб до хронічного впливу.

Зміни показників енергетичного обміну в тканинах риб оцінювали за вмістом аденілових нуклеотидів (АТФ, АДФ, АМФ), які визначали методом висхідної одномірної тонкошарової хроматографії на силікагелевих пластинках «Sorbfil» з подальшим спектрофотометричним аналізом при довжині хвилі λ = 260 нм. Отримані значення використовували для розрахунку аденілатного енергетичного заряду (АЕЗ), співвідношення аденілових нуклеотидів та показника динамічної маси аденілаткіназної реакції (ДМАК), що дозволяло оцінити стан енергетичного метаболізму клітин у тканинах риб різного виду та віку.

Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у тканинах риб визначали за вмістом вторинних продуктів ПОЛ – тіобарбітуровокислотно-активних продуктів (ТБК-активних сполук), які визначали спектрофотометричним методом за реакцією з тіобарбітуровою кислотою з вимірюванням оптичної густини при λ = 532 нм. Результати виражали в нмоль малонового діальдегіду на 1 г тканини, що дозволяло оцінити ступінь оксидативного ушкодження клітинних мембран за дії мікотоксинів.

Для характеристики метаболічних процесів у тканинах риб визначали вміст неорганічного фосфору за методом Фіске–Суббароу, а також аналізували зміни показників енергетичного обміну, що відображають функціональний стан клітин в умовах токсичного навантаження. Отримані біохімічні показники розглядали як інформативні маркери метаболічної перебудови та адаптаційних реакцій організму риб у відповідь на дію афлатоксину В1 та Т-2 токсину.

Комплексне використання методів аналізу нуклеїнового обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних процесів дозволило оцінити як рівень токсичного навантаження, так і адаптаційні можливості організму ставкових риб різного виду та віку.

Результати дослідження та обговорення

Результати досліджень свідчать, що дія афлатоксину В1 та Т-2 токсину супроводжується істотними змінами показників енергетичного обміну в тканинах ставкових риб. У дослідних групах риб відзначалося зниження вмісту аденозинтрифосфату (АТФ) на тлі підвищення концентрацій аденозиндифосфату (АДФ) та аденозинмонофосфату (АМФ) порівняно з контролем, що свідчить про порушення енергетичного гомеостазу клітин (табл. 1).

Таблиця 1

Зміни показників нуклеїнового обміну в тканинах ставкових риб різного виду та віку за дії мікотоксинів (M ± m)

Вид риби	Вік	Умови досліду	АТФ, мкмоль/г тканини	АДФ, мкмоль/г тканини	АМФ, мкмоль/г тканини	АЕЗ
Короп лускатий	цьоголітки	Контроль	3,85 ± 0,12	1,24 ± 0,05	0,56 ± 0,03	0,83
		Афлатоксин В1	2,96 ± 0,10*	1,58 ± 0,06*	0,81 ± 0,04*	0,75
		Т-2 токсин	2,74 ± 0,09*	1,71 ± 0,07*	0,88 ± 0,05*	0,72
	дворічки	Контроль	4,12 ± 0,15	1,18 ± 0,04	0,49 ± 0,02	0,85
		Афлатоксин В1	3,21 ± 0,11*	1,46 ± 0,05*	0,73 ± 0,04*	0,78
		Т-2 токсин	3,02 ± 0,12*	1,59 ± 0,06*	0,79 ± 0,04*	0,75
Карась звичайний	цьоголітки	Контроль	3,64 ± 0,13	1,32 ± 0,06	0,61 ± 0,03	0,81
		Афлатоксин В1	2,88 ± 0,10*	1,62 ± 0,07*	0,86 ± 0,04*	0,73
		Т-2 токсин	2,65 ± 0,09*	1,75 ± 0,08*	0,94 ± 0,05*	0,70
	дворічки	Контроль	3,92 ± 0,14	1,25 ± 0,05	0,54 ± 0,03	0,84
		Афлатоксин В1	3,10 ± 0,11*	1,48 ± 0,06*	0,77 ± 0,04*	0,77
		Т-2 токсин	2,89 ± 0,10*	1,63 ± 0,07*	0,83 ± 0,04*	0,74

Одним із ключових наслідків дії мікотоксинів на організм риб є індукція оксидативного стресу, що підтверджується зростанням інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у тканинах дослідних груп. У результаті експерименту встановлено достовірне підвищення вмісту ТБК-активних продуктів у печінці та м’язовій тканині риб за дії як афлатоксину В1, так і Т-2 токсину.

Так, у печінці цьоголіток коропа лускатого вміст ТБК-активних продуктів у контрольній групі становив у середньому 3,6 ± 0,2 нмоль МДА/г тканини, тоді як за дії афлатоксину В1 цей показник зростав до 5,1 ± 0,3 нмоль/г ($p < 0,05$), а за дії Т-2 токсину – до 5,7 ± 0,3 нмоль/г ($p < 0,05$). У дворічок коропа інтенсивність ПОЛ була дещо нижчою: відповідно 3,2 ± 0,2, 4,4 ± 0,2 та 4,9 ± 0,3 нмоль МДА/г тканини, що свідчить про вищу стійкість старших вікових груп до мікотоксичного навантаження.

У карася звичайного зміни інтенсивності перекисного окиснення ліпідів були більш вираженими. Зокрема, у печінці цьоголіток контрольні значення становили 3,8 ± 0,2 нмоль МДА/г тканини, тоді як за дії афлатоксину В1 рівень ТБК-активних продуктів підвищувався до 5,6 ± 0,3 нмоль/г, а за дії Т-2 токсину – до 6,2 ± 0,4 нмоль/г ($p < 0,05$). У дворічок карася відповідні показники складали 3,4 ± 0,2, 4,8 ± 0,3 та 5,3 ± 0,3 нмоль МДА/г тканини.

Аналогічна тенденція простежувалася і в м’язовій тканині риб, хоча абсолютні значення були нижчими. У цьоголіток коропа вміст ТБК-активних продуктів зростав з 2,1 ± 0,1 нмоль/г у контролі до 3,2 ± 0,2 нмоль/г за дії афлатоксину В1 та 3,6 ± 0,2 нмоль/г за дії Т-2 токсину. У карася

звичайного відповідні показники становили 2,3 ± 0,1, 3,6 ± 0,2 та 4,0 ± 0,3 нмоль МДА/г тканини ($p < 0,05$).

Посилення ПОЛ свідчить про ушкодження ліпідного шару клітинних мембран та зниження їхньої структурно-функціональної стабільності. Відомо, що афлатоксин B1 здатний ініціювати утворення активних форм кисню, що призводить до ліпопероксидації та вторинних метаболічних порушень (Pickova et al., 2021; Simonova & Mekhed, 2025a). Аналогічні механізми дії характерні й для Т-2 токсину, який проявляє виражену прооксидантну активність (Mekhed, 2024).

Значне підвищення рівня продуктів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ), зокрема малонового діальдегіду, слід розглядати як фундаментальний, ранній і надзвичайно чутливий біохімічний маркер екзогенного токсичного навантаження. Цей показник інтегрально відображає не лише безпосередній ступінь деструкції клітинних мембран, а й загальний стан та ефективність адаптаційних реакцій антиоксидантної системи організму у відповідь на оксидативний стрес.

Виявлені нами закономірності посилення ліпопероксидації чітко узгоджуються з масивом даних попередніх досліджень, проведених на різних видах коропових риб за умов експозиції до токсикантів різної хімічної природи – від важких металів до органічних сполук (Simonova & Mekhed, 2025b). Це підтверджує універсальний характер вільнорадикального ушкодження як первинної ланки патогенезу при інтоксикації гідробіонтів.

Комплексний аналіз динаміки метаболічних процесів у ключових тканинах риб (печінці, м'язах, зябрах) продемонстрував, що тривале мікотоксичне навантаження ініціює глибоку системну перебудову обміну речовин. Зокрема, зафіксовані зсуви в показниках енергетичного метаболізму свідчать про критичне напруження ланок фосфатного обміну.

Це проявляється у дефіциті макроергічних сполук та порушенні процесів аеробного енергозабезпечення клітин, що змушує організм переходити на менш ефективні анаеробні шляхи ресинтезу АТФ. Такі зміни вказують на виснаження функціональних резервів риб та розвиток метаболічного дисонансу, що в подальшому може призвести до зниження резистентності популяції в цілому.

Водночас виявлені метаболічні зрушення мають не лише деструктивний, а й адаптаційний характер. Активація катаболічних процесів, перерозподіл енергетичних ресурсів і зміна співвідношення аденілових нуклеотидів можна розглядати як механізми, спрямовані на підтримання гомеостазу за умов токсичного стресу. Подібні адаптаційні реакції описані для коропа лускатого за впливу різних форм антропогенного забруднення та токсикантів (Nikolaenko et al., 2023; Shkurko et al., 2024).

Таким чином, результати дослідження свідчать, що показники нуклеїнового обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних процесів у тканинах риб є інформативними біохімічними маркерами токсичного навантаження та адаптаційних реакцій за дії мікотоксинів. Комплексне використання цих показників дозволяє більш повно охарактеризувати механізми мікотоксичної дії та оцінити стійкість ставкових риб до контамінованих кормів і водного середовища.

Висновки

Установлено, що дія афлатоксину B1 та Т-2 токсину спричиняє істотні порушення енергетичного обміну в тканинах ставкових риб, які проявляються зниженням вмісту аденозинтрифосфату на тлі зростання концентрацій аденозинди- та аденозинмонофосфату. Такі зміни свідчать про напруження енергетичного метаболізму клітин за умов мікотоксичного навантаження.

Зниження аденілатного енергетичного заряду в тканинах коропа лускатого та карася звичайного в умовах дії мікотоксинів вказує на порушення процесів енергозабезпечення та активацію компенсаторно-адаптаційних механізмів, спрямованих на підтримання клітинного гомеостазу.

Посилення інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у тканинах риб за дії афлатоксину B1 та Т-2 токсину свідчить про розвиток оксидативного стресу та ушкодження клітинних мембран, що є одним із провідних механізмів токсичної дії мікотоксинів.

Виявлені зміни показників метаболічних процесів, зокрема енергетичного та фосфатного обміну, мають комплексний

характер і відображають як деструктивні наслідки мікотоксичного впливу, так і адаптаційні реакції організму риб, спрямовані на збереження функціональної стабільності.

Ступінь біохімічних порушень залежить від виду та віку риб: більш виражені зміни встановлено у цьоголіток порівняно з дворічками, а також у карася звичайного порівняно з коропом лускатим, що свідчить про міжвидову та вікову чутливість до дії мікотоксинів.

Показники енеретичного обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних процесів у тканинах ставкових риб можуть бути рекомендовані як інформативні біохімічні маркери токсичного навантаження та адаптаційних реакцій організму за умов контамінації водного середовища та кормів мікотоксинами.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів/ Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Експериментальні процедури були схвалені Комісією з біоетики Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г.Шевченка (No протоколу: 5, 3 жовтня 2024 р., Чернігів, Україна) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Committee of T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium» (Protocol Number: 5, 3 October 2024, Chernihiv, Ukraine).

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Не застосовується / Not applicable.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data

References

Filonenko, D., & Mekhed, O. (2025). Biochemical assessment of the effect of aflatoxin B1 on nucleic acid levels in tissues of crucian carp (*Carassius carassius*). *Biota. Human. Technology*, (3), 95–102. https://doi.org/10.58407/bht.3.25.9

Філоненко Д., Мехед О. Біохімічна оцінка впливу афлатоксину В1 на рівень нуклеїнових кислот у тканинах карася звичайного (*Carassius carassius*). *Biota. Human. Technology*. 2025. № 3. С. 95–102. DOI: https://doi.org/10.58407/bht.3.25.9

Fornari, D.C., Peixoto, S., Ksepka, S.P., Bullard, S.A., Rossi, W., Nuzback, D.E., & Davis, D.A. (2023). Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hermatological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, *4*, 1281722. https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722

Gruber-Dorninger, C., Müller, A., & Rosen, R. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*, *17*(3), 116. https://doi.org/10.3390/toxins17030116

Hassan, F. F. (2018). Detection of aflatoxin B1 in some canned foods and reduction of toxin by ultraviolet radiation. *Iraqi Journal of Science*, *58*(4C), 2343–2349. https://doi.org/10.24996/ijs.2017.58.4C.10

Koletsi, P., Schrama, J.W., Graat, E.A.M., Wiegertjes, G.F., Lyons, P., & Pietsch, C. (2021). The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species—A Review. *Toxins, 13*(6), 403. https://doi.org/10.3390/toxins13060403

Kovalsky, P., Kos, G., Nährer, K., Schwab, C., Jenkins, T., Schatzmayr, G., Sulyok, M., & Krska, R. (2016). Co-occurrence of regulated, masked and emerging mycotoxins and secondary metabolites in finished feed and maize-an extensive survey. *Toxins*, *8*, 363. https://doi.org/10.3390/toxins8120363

Liu, H., Xie, R., Huang, W., Yang, Y., Zhou, M., Lu, B., Li, B., Tan, B., & Dong, X. (2023). Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus Epinephelus lanceolatus*). *Aquaculture Reports*, *33*, 101779. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779

Lye, M. S., Ghazali, A. A., Mohan, A. A., Alwin, N. & Nair, R.C. (1995). An outbreak of acute hepatic encephalopathy due to severe aflatoxicosis in Malaysia. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 53, 68–72.

Mekhed, O. (2024). Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. *One World – One Health: I International Scientific and Practical Conference* (4–5 June 2024, Słupsk, Poland). P. 263–266.

Mushtaq, M., Sultana, V., Anwar, F., Adnan A. & Rizvi, S. S. H. (2012). Occurrence of aflatoxins in selected processed foods from Pakistan. *International Journal of Molecular Sciences*, *13*(7), 8324–8337. https://doi.org/10.3390/ijms1307832

Nikolaenko, T., Ivashchenko, M., Ivashchenko, N., & Mekhed, O. (2023). Adaptive changes in blood indicators of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) in response to water pollution. *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change.* Chernihiv: Desna-Polihraf, 99–100. (in Ukrainian).

Ніколаєнко Т., Іващенко М., Іващенко Н., Мехед О. Адаптивні зміни показників крові коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) як відповідь на забруднення води. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату.* Чернігів: Десна-Поліграф, 2023. С. 99–100.

Pickova D., Ostry V., Malir F. A (2021). Recent Overview of Producers and Important Dietary Sources of Aflatoxins. Toxins. 13:186. https://doi.org/10.3390/toxins13030186

Pleadin, J., Zadravec, M., Brnić, D., Perković, I., Škrivanko, M. & Kovačević, D. (2017). Moulds and mycotoxins detected in the regional speciality fermented sausage «slavonski kulen» during a 1-year production period. *Food Additives & Contaminants*: Part A, 34(2), 282–290. https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1266395

Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed T-2 toxin-contaminated feed. *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change.* Chernihiv: Desna-Polihraf, 105–106. (in Ukrainian).

Полотнянко Л., Мехед О. Накопичення мікотоксинів у м'язах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) при згодовуванні корму, контамінованого Т2-токсином. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату.* Чернігів: Десна-Поліграф, 2023. С. 105–106.

Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2024). Changes in the morphological indicators of carp under the action of mycotoxin T2. *Biota. Human. Technology,* (3), 69–76. https://doi.org/10.58407/bht.3.24.4 (in Ukrainian)

Sevi, A., Marino, R., Lorenzo, J. M., Picard, B., & Pereira, A. S. C. (2016). Strategies to improve meat quality and safety. *The Scientific World Journal*, Article ID 9523621. https://doi.org/10.1155/2016/9523621

Shkurko, M., Sadchenko, N. M., & Mekhed, O. (2024). Influence of water environment contamination with mycotoxins on ichthyological indicators and metabolic processes in carp fish. *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation of Students, Graduate Students and Young Scientists* (20 November 2024, Chernihiv). Chernihiv: Nizhyn Mykola Gogol University, 89–90. (in Ukrainian).

Шкурко М., Садченко Н. М., Мехед О. Вплив забруднення водного середовища мікотоксинами на іхтіологічні показники та метаболічні процеси в організмі коропових риб. *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю студентів, аспірантів і молодих учених* (20 листопада 2024 р., Чернігів). Чернігів: НУЧК імені Т. Г. Шевченка, 2024. С. 89–90.

Simonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2025a). Effect of toxicants of different chemical nature on lipid peroxidation intensity in the liver of scaly carp (*Cyprinus carpio*). *Natural Science Education and Science*, Issue 4, 171–180. (in Ukrainian).

Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив токсикантів різної хімічної природи на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у печінці коропа лускатого (*Cyprinus carpio*). *Природнича освіта і наука*. 2025. Вип. 4. С. 171–180.

Simonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2025b). Effect of aflatoxin B1 on lipid peroxidation intensity in tissues of crucian carp (*Carassius carassius*). *Slobozhansky Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences*, Issue 2, 65–69. (in Ukrainian). https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.8

Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив афлатоксину В1 на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у тканинах карася звичайного (*Carassius carassius*). *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2025. Вип. 2. С. 65–69.

Strosnider, H., Azziz-Baumgartner, E., Banziger, M., Bhat, R.V., Breiman, R., Brune, M.N., DeCock, K., Dilley, A., Groopman, J., Hell, K., Henry, S.H., Jeffers, D., Jolly, C., Jolly, P., Kibata, G.N., Lewis, L., Liu, X., Luber, G., McCoy, L., Mensah, P., Miraglia, M., Misore, A., Njapau, H., Ong, C.N., Onsongo, M.T., Page, S.W., Park, D., Patel, M., Phillips, T., Pineiro, M., Pronczuk, J., Rogers, H.S., Rubin, C., Sabino, M., Schaafsma, A., Shephard, G., Stroka, J., Wild, C., Williams, J.T., & Wilson, D. (2006). Workgroup report: Public health strategies for reducing aflatoxin exposure in developing countries. *Environmental Health Perspectives*, 114(12), 1898–1903. https://doi.org/10.1289/ehp.9302

Vanhoutte, I., Audenaert, K., & De Gelder, L. (2016). Biodegradation of mycotoxins: Tales from known and unexplored worlds. *Frontiers in Microbiology*, 7, 561. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00561

Received: 09.02.2026.**Accepted:** 06.03.2026.**Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Полотнянко Л., Філоненко Д. Біохімічні маркери токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів. *Biota. Human. Technology.* 2026. № 1. С. 51-60. DOI: https://doi.org/10.58407/bht.1.26.4

Cite this article in APA style as:

Polotnianko, L., & Filonenko, D. (2026). Biokhimichni markery toksychnoho navantazhennia ta adaptatsiinykh reaktsii stavkovykh ryb za dii mikotoksyniv [Biochemical markers of toxic load and adaptative reactions of pond fish to mycotoxins]. *Biota. Human. Technology,* (1), 51-60. https://doi.org/10.58407/bht.1.26.4 (in Ukrainian)

Information about the authors:

Polotnianko L. [*in Ukrainian:* **Полотнянко Л.]** [1],Ph. D. student, email: chreglab@vetmed.gov.ua
ORCID: 0000-0001-8665-2648
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Filonenko D. [*in Ukrainian*: **Філоненко Д.]** [2], Ph. D. student, email: filonenkoD@gmail.com
ORCID: 0009-0007-0631-1669
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

[1] Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.
[2] Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.